

高温颗粒引燃转炉煤气的实验研究

尚融雪¹, 李 刚¹, 于立富¹, 董茂林²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 401122)

摘 要: 为分析转炉煤气显热回收过程中被高温颗粒引燃危险性, 自行设计了激光辐射加热氧化铁颗粒引燃转炉煤气实验平台. 以转炉煤气/空气混合物压力及温度变化为引燃判据, 研究不同初始温度及粒径颗粒引燃混合物的规律. 结果表明, 转炉煤气/空气混合物存在引燃敏感浓度, 当受辐射颗粒粒径相同、初始温度为 100 °C 时混合物敏感浓度比 35 °C 时上升了 5%; 初始温度为 35, 100, 200 °C 时, 粒径 1.5 mm 的颗粒引燃温度比 0.5 mm 的分别下降 137.6, 145 及 134.5 °C; 颗粒粒径为 0.5, 1.0 及 1.5 mm 时, 初始温度为 200 °C 时的引燃温度比 35 °C 时分别下降了 19.8, 11.6 及 16.7 °C. 研究结果对高温转炉煤气进入换热器前设置除尘粒径限制具有参考意义.

关 键 词: 高温颗粒; 转炉煤气; 激光加热; 粒径; 引燃温度

中图分类号: TD 712.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2015)09-1342-05

Experimental Research of the Ignition of Converter Gases by Hot Particles

SHANG Rong-xue¹, LI Gang¹, YU Li-fu¹, DONG Mao-lin²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. SISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, China. Corresponding author: LI Gang, E-mail: ligang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to analyze the explosion risk of converter gases in the process of reclaiming, a set of test devices for converter gas ignition by iron oxide particles heated radiatively was set up. The rules of mixture ignition at varied initial temperatures and with particle diameters were investigated, based on the explosion pressure and temperature changes of converter gases/air mixtures. The results showed that when the particle diameters are constant, the sensitive concentrations of converter gases/air mixtures increase by 5% if the initial temperature changes from 100 °C to 35 °C. The ignition temperatures of 1.5 mm-diameter particles drop by 137.6, 145 and 134.5 °C compared to the 0.5 mm-diameter particles when the initial temperature is 35, 100 and 200 °C respectively. When the particle diameters are 0.5 mm, 1.0 mm and 1.5 mm separately, the ignition temperatures decrease by 19.8, 11.6 and 16.7 °C with the initial temperature changing from 200 °C to 35 °C. The research findings can provide a reference for limiting hot particle diameters before high temperature converter gases enter heat exchangers.

Key words: hot particle; converter gas; laser heating; particle diameter; ignition temperature

转炉炼钢生产过程中会产生大量的高温转炉煤气,在其回收工艺中,经过高温环境的氧化颗粒会随转炉煤气一同混入设备中,如有空气同时进入,这些高温颗粒便会成为引燃转炉煤气的点火源,具有危险性.与不需要施加外界能量而自动着火的热自燃不同,高温颗粒引燃转炉煤气的反应

是首先靠近高温颗粒(点火源)的转炉煤气层引发并传播到温度较低的其他部分,属于其他点火源引燃可燃混合物的强迫着火^[1].在以非电气火花为引燃源的强迫点火研究中,已有学者对摩擦、撞击等引燃可燃气体及气粉混合物的现象进行了大量的理论分析及实验研究^[2-3].在高温颗粒引

收稿日期: 2014-07-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074041).

作者简介: 尚融雪(1987-),女,辽宁沈阳人,东北大学博士研究生;李 刚(1969-),男,河南信阳人,东北大学教授,博士生导师

燃可燃混合物方面, Thomas 等^[4]在常温下, 通过激光加热煤颗粒及氧化铁颗粒引燃甲烷/空气混合物, 并描述了激光引燃可燃气体混合物的热层理论; Beyrau 等^[5]通过加热炭黑、石墨等颗粒, 引燃丁烷/空气混合物, 发现较细的颗粒由于具有较大的比表面积, 其引燃时间较短; Kuznetsov 等^[6-7]对高温颗粒引燃可燃混合物进行了大量实验和数值模拟研究, 结果表明, 在初始温度和颗粒大小确定的情况下, 点火延迟时间与颗粒运动速度、空气湿度等相关; 海彦合^[8]以连续激光破岩产生的温度分布及热爆炸理论为基础, 推导出高温热点引燃瓦斯气体的温度与激光功率及瓦斯浓度的关系。

大部分相关研究是在常温下进行的, 但在实际生产中, 高温转炉煤气含有大量显热, 为了使这部分显热能被合理利用, 需要利用汽化冷却系统实现转炉煤气高温下的余热回收。可燃气体在高温环境中的燃烧特性与常温条件下有所不同, Wierzb 等^[9]实验得到随初始温度的升高, 可燃

性气体的燃烧下限变低, 燃烧上限变高; Cammarota 等^[10]研究得到可燃气体的最大爆炸压力随初始压力的增大而上升, 随初始温度的升高而下降; Ciccarelli 等^[11]通过测试 $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{N}_2$ /空气混合物在高温、常压条件下的燃烧极限, 得到当初始温度达到 500, 600 $^{\circ}\text{C}$, NH_3 体积分数超过 70%, 50% 时, 混合物会发生自燃。

本文根据实际情况, 开展高温颗粒引燃转炉煤气实验研究, 对高温转炉煤气回收过程中安全性及大量显热的合理利用具有较好的参考意义。

1 实验材料和实验方法

1.1 实验装置

本实验参照 DIN EN1839:2003^[12], 设计并搭建了转炉煤气爆炸实验系统(见图1)。系统由爆炸反应罐体、电加热炉、激光加热装置及数据动态采集分析系统组成。

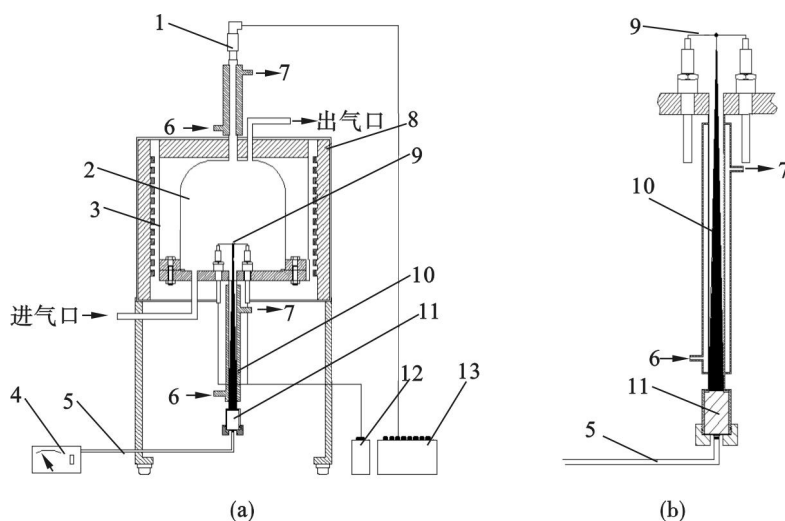


图1 实验测试系统分布图

Fig. 1 Schematic of experiment testing system

(a)—实验系统; (b)—激光加热颗粒局部图。

1—压力传感器; 2—爆炸腔体; 3—加热炉; 4—激光器; 5—光纤; 6—冷却水入口; 7—冷却水出口; 8—保温层; 9—高温颗粒、热电偶; 10—激光光束; 11—准直器; 12—温度数据采集器; 13—压力数据采集器。

爆炸反应装置是直径 220 mm、高 220 mm、顶部圆形封头、底部平板法兰的不锈钢罐体, 罐体顶端连接压力传感器, 整个罐体放置在圆柱形可调温电加热炉内加热, 压力传感器、激光准直器与爆炸腔体连接处设计了循环水冷却系统。实验中的激光由 CW-808 nm 光纤耦合激光器输出, 输出功率 0 ~ 10 W 可调, 通过光纤准直器聚焦(光斑直径小于 2 mm)。将直径为 0.5, 1.0 及 1.5 mm 的氧化铁颗粒粘贴在 K 型热电偶丝的顶端(见图

2), 热电偶既为颗粒支持件, 同时测量被激光照

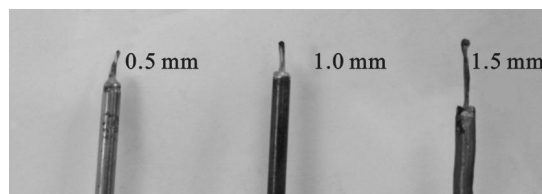


图2 粘贴于热电偶丝的不同直径氧化铁颗粒

Fig. 2 Iron oxide particles with different diameters gluing on the thermocouple

射颗粒的温度变化,通过爆炸腔底端的准直器调焦,使颗粒固定在激光聚焦位置.使用 DEWE-MDAQ-PCI-16 通道瞬态数据采集系统分析器实时记录爆炸腔体内的压力变化,使用 8 通道温度数据采集模块记录爆炸腔体及高温颗粒温度变化.

1.2 实验方法

1.2.1 配气

本实验使用的是一种工业上应用较广且典型的转炉煤气,采用分压法配置转炉煤气(CO 80%, CO_2 5%, H_2 1%, N_2 4%)与空气混合物.通过计算得到预配置混合气中各组分气体的理论分压值,依次充入绝对真空的混气罐中,整个充气过程要求尽量缓慢,准确控制阀门,减缓混气瓶内浓度变化.开启搅拌器搅拌均匀,并静止一段时间以便充分混合.通过前期对该组分转炉煤气爆炸极限范围的测试^[13],选取 6 种浓度配置混合气,其体积分数分别为 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%,具体各组分浓度见表 1.

1.2.2 激光加热颗粒引燃混合物

使用温度控制系统调节爆炸腔体内初始温度(35, 100, 200 $^{\circ}\text{C}$);将配置好的混合气充入绝对真空的爆炸腔体内;开启数据动态采集分析系统开始计时.此时记录的热电偶温度是爆炸腔体内的初始温度;启动激光器,激光光源通过准直器在黏结于热电偶丝顶端的氧化铁颗粒上聚焦,观察氧化铁颗粒被激光加热的温度变化,此时爆炸腔体内没有压力的变化,即无爆炸反应.对于封闭容器

通常以爆炸压力来判定是否发生爆炸反应^[12],根据实验经验,当升压超过 0.5 bar 时认为发生了爆炸;激光继续加热颗粒,当颗粒被加热到一定温度时,如果爆炸发生,可以观察到压力值较明显的升高,读取并分析实验数据;如果加温持续 180 s 后压力值仍无明显变化,认为未发生爆炸.

表 1 实验混合气各组分浓度

Table 1 Component concentration of mixtures

编号	组分体积分数/%				
	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	air
1 [#]	20.00	3.75	0.25	1.00	75
2 [#]	24.00	4.50	0.30	1.20	70
3 [#]	28.00	5.25	0.35	1.40	65
4 [#]	32.00	6.00	0.40	1.60	60
5 [#]	36.00	6.75	0.45	1.80	55
6 [#]	40.00	7.50	0.50	2.00	50

2 实验结果

2.1 高温颗粒引燃不同浓度转炉煤气

根据前期对转炉煤气爆炸特性实验研究^[13],不同初始温度下(35, 100, 200 $^{\circ}\text{C}$),分别选取不同浓度转炉煤气/空气混合物进行实验.通过总结大量实验数据得到各初始温度下,不同粒径颗粒引燃不同浓度混合物的实验数据,如图 3,图 4 所示.

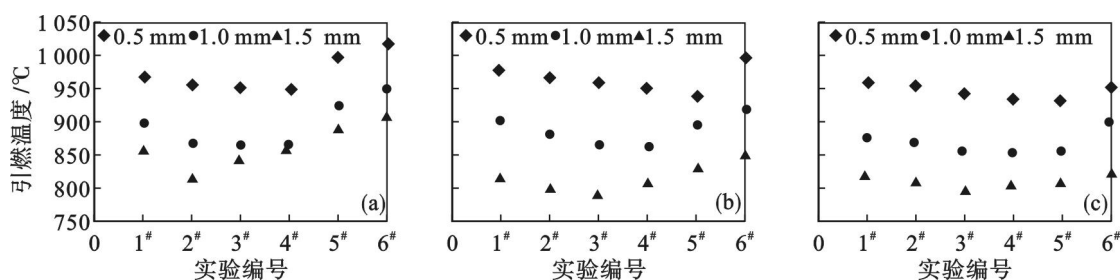


图 3 高温颗粒引燃不同浓度混合物的引燃温度

Fig. 3 Ignition temperatures of mixtures with different concentrations

(a)—35 $^{\circ}\text{C}$; (b)—100 $^{\circ}\text{C}$; (c)—200 $^{\circ}\text{C}$.

当初始温度及受辐射颗粒粒径相同时,引燃转炉煤气/空气混合物的温度会随混合浓度的增大呈现先下降后上升的变化趋势,由此可判断混合物在不同温度下的引燃敏感浓度.当所选用粒径为 0.5 mm 的氧化铁颗粒为引燃颗粒时,在初始温度为 35, 100, 200 $^{\circ}\text{C}$ 时,该组分转炉煤气分别在体积分数为 40%, 45% 及 45% 时达到了引燃温度的相对最低值,即 951.6, 940.8 和 932.8 $^{\circ}\text{C}$;当

粒径为 1.0 mm 时,该组分转炉煤气在不同初始温度下的敏感浓度(体积分数)为 35%, 40% 以及 40%;当粒径为 1.5 mm 时,该组分转炉煤气在不同初始温度下的敏感浓度为 30%, 35% 以及 35%.与引燃温度相反,爆炸压力随着转炉煤气浓度的增大呈现先增加后减小的趋势.在转炉煤气的敏感浓度下,爆炸压力往往达到最大值.

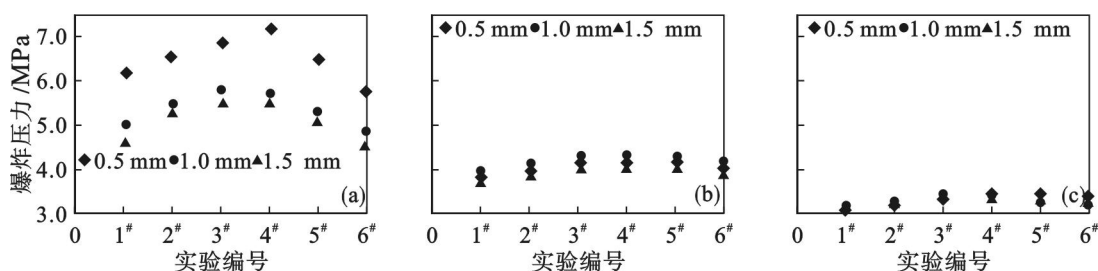


图4 高温颗粒引燃不同浓度混合物的爆炸压力

Fig. 4 Explosion pressures of mixtures with different concentrations

(a)—35 °C; (b)—100 °C; (c)—200 °C.

2.2 不同粒径高温颗粒引燃转炉煤气

根据上一节分析,转炉煤气在不同初始温度中存在敏感浓度.分析不同初始温度条件下(35, 100, 200 °C),不同粒径高温颗粒(0.5, 1.0,

1.5 mm)引燃敏感浓度下的转炉煤气/空气混合物的温度(见图5).其中 t_1 为环境的初始温度, t_2 为受辐射高温颗粒引燃混合物的温度.

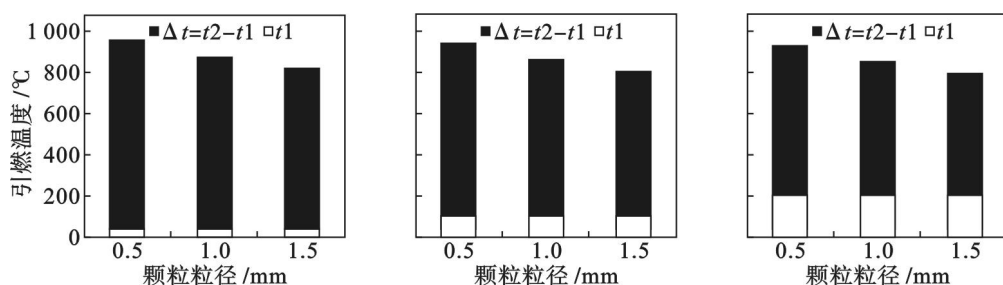


图5 不同粒径高温颗粒引燃温度

Fig. 5 Ignition temperatures with different particle diameters

(a)—35 °C; (b)—100 °C; (c)—200 °C.

当 t_1 相同时, t_2 随着颗粒粒径的增大明显降低,当初始温度为35, 100, 200 °C时,粒径为1.5 mm的颗粒引燃温度比粒径为0.5 mm的分别下降137.6, 145及134.5 °C.从图3也可以看出,当 t_1 及转炉煤气浓度一定时(可能为非敏感浓度), t_2 同样是随着颗粒粒径的增大明显降低,说明在实际转炉煤气回收过程中,如有空气进入设备,在转炉煤气的燃烧极限范围内,粒径较大的

颗粒更易引燃转炉煤气/空气混合物.此外,从2.1节分析也可得到,在实际生产过程中,与粒径较小的颗粒相比,对于粒径较大的颗粒只需要有较少的空气混入便会引燃混合物.

2.3 不同初始温度下高温颗粒引燃转炉煤气

不同初始温度条件下(35, 100, 200 °C),相同粒径的高温颗粒(0.5, 1.0, 1.5 mm)引燃敏感浓度下的转炉煤气/空气混合物的温度如图6所示.

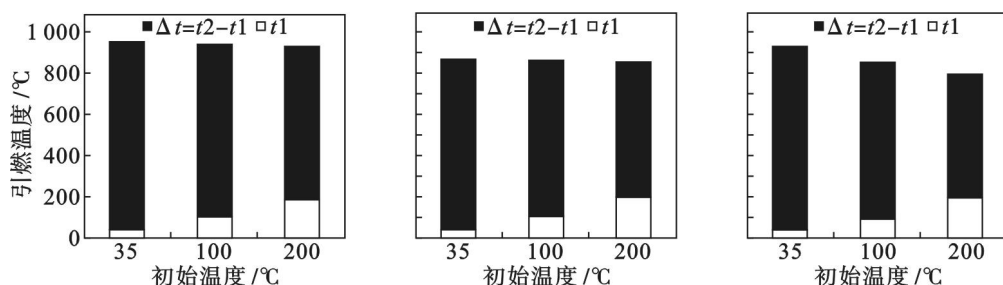


图6 不同初始温度条件下颗粒引燃温度

Fig. 6 Ignition temperatures with different initial temperatures

(a)—0.5 mm; (b)—1.0 mm; (c)—1.5 mm.

当粒径相同时, t_2 随 t_1 的升高呈现下降的趋势,当引燃颗粒粒径为0.5, 1.0及1.5 mm时,

初始温度为200 °C时的颗粒引燃温度比初始温度为35 °C时分别下降19.8, 11.6, 16.7 °C. Δt 在 t_1

上升的过程中必然降低,以此推测,当初始温度达到混合物自燃温度时,颗粒的温度即使没有超过初始温度,混合物也会发生反应.从图 3 也可以得到,在颗粒粒径相同的条件下,当转炉煤气浓度一定时(可能为非敏感浓度),高温颗粒的引燃温度 t_2 同样是随着初始温度的升高而呈现下降的趋势.通过前期的研究成果也能发现^[13],当初始温度达到 600 ℃ 时,爆炸极限范围内混合气通入爆炸腔体的过程中,进气口处会发出“嘭”的响声,且混合物不会再被电火花引燃,说明混合物在 9.7%~86.1% 爆炸极限内发生自燃.在实际转炉煤气回收过程中,当设备内达到一定高温时,如果有足够的空气进入设备,本身就会发生爆炸.

3 结 论

1) 参照 DIN EN1839:2003 及实际情况,自行设计搭建了高温条件下,激光加热颗粒引燃转炉煤气的实验平台,进行了相关的实验研究,该实验平台具有一定的实用性及创新性.

2) 在初始温度相同的情况下,相同粒径的高温颗粒引燃不同浓度转炉煤气的温度不同,该组分转炉煤气在不同条件下存在引燃敏感浓度,在敏感浓度下混合物的爆炸压力往往达到最大.

3) 当高温颗粒粒径相同时,该组分转炉煤气的敏感浓度在初始温度为 100 ℃ 时比在初始温度为 35 ℃ 时上升了 5 个百分点.

4) 在初始温度相同的情况下,高温颗粒的引燃温度随颗粒粒径的增大而明显降低,当初始温度为 35,100,200 时,粒径为 1.5 mm 的颗粒引燃温度比粒径为 0.5 mm 的分别下降 137.6,145,134.5 ℃,在相同初始条件下,粒径大的高温颗粒引燃混合物的危险性较大.

5) 当高温颗粒粒径相同时,高温颗粒的引燃温度会随初始温度的升高而略有下降.当引燃颗粒粒径为 0.5,1.0 及 1.5 mm 时,初始温度为 200 ℃ 时的颗粒引燃温度比初始温度为 35 ℃ 时分别下降 19.8,11.6,16.7 ℃.

今后将通过改进实验平台及调查实际工业生产过程,在更高温度条件下,对其他组分的转炉煤气进行相关实验研究,完善测试数据,以期对高温转炉煤气高效、安全的回收利用具有更科学、全面的指导意义.

参考文献:

- [1] 岑可法,姚强,骆仲泐,等. 高等燃烧学[M]. 浙江:浙江大学出版社,2002:32-68.
(Cen Ke-fa, Yao Qiang, Luo Zhong-yang, et al. Advanced combustion theory[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2002:32-68.)
- [2] Li G, Shang R X, Yu Y J, et al. Influence of coal dust on the ignition of methane/air mixtures by friction sparks from rubbing of titanium against steel[J]. *Fuel*, 2013, 113: 448-453.
- [3] Bennett J M. Ignition of combustible fluids by heated surface[J]. *Process Safety Progress*, 2001, 20(1): 29-36.
- [4] Thomas H, Dubaniewicz J, Kenneth L, et al. Ignition of methane-air mixtures by laser heated small particles[J]. *Journal of Loss Prevention*, 2000, 13(3/4/5): 349-359.
- [5] Beyrau F, Hadjipanayis M A, Lindstedt R P. Ignition of fuel/air mixtures by radiatively heated particles[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2065-2072.
- [6] Kuznetsov G V, Strizhak P A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53(5/6): 923-930.
- [7] Kuznetsov G V, Strizhak P A. Numerical solution of the problem of a combustible liquid by a single hot particle[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2009, 45(5): 543-550.
- [8] 海彦合. 矿井下连续波激光点燃瓦斯的研究[J]. 光子学报, 1998, 27(4): 352-355.
(Hai Yan-he. Research on ignition of gases by continuous wave laser under the mine[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(4): 352-355.)
- [9] Wierzbna I, Kilchuk V. Flammability limits of hydrogen-carbon monoxide mixtures at moderately elevated temperature[J]. *Hydrogen Energy*, 2001, 26(6): 639-643.
- [10] Cammarota F, Benedetto A D, Russo P, et al. Experimental analysis of gas explosions at non-atmospheric initial conditions in cylindrical vessel[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2010, 88(5): 341-349.
- [11] Ciccarelli G, Jackson D, Verreault J. Flammability limits of $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-N}_2$ -air mixtures at elevated initial temperatures[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(1/2): 53-63.
- [12] European Committee for Standardization. BS EN 1839: 2003. determination of explosion limits of gases and vapors[S]. British: Standards Policy and Strategy Committee, 2004.
- [13] 金朝. 高温冶金炉煤气爆炸特性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
(Jin Chao. Experimental research on explosion characters of metallurgical gases in high temperatures[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.)